



锦江瑶山船闸通航水流条件优化试验研究

徐俊锋, 赵家强

(交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 针对锦江瑶山枢纽新建船闸上下游引航道中心线与河道交角大、河道窄及过渡短的问题, 通过船闸通航水流条件及自航船模试验, 开展船闸布置方案优化试验研究, 提出改善水流条件的措施。试验结果表明: 上游采用透水式隔流堤可增强水流渗透性, 平衡引航道与主航道流速差, 降低流速梯度, 优化隔流堤长度和高度后, 减少主流对口门区的直接冲击, 有效减弱引航道口门区的横流、回流等不利流态; 下游通过调整河道底坡能改善尾水流态, 下接疏浚区增加消能可缓冲下泄水流, 有效改善瑶山船闸通航水流条件, 为S形弯曲河段船闸布置提供参考。船模试验表明, 最大通航流量 $160\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 船舶通过上下游引航道口门区及连接段时航向能够保持稳定, 舵角、漂距等参数均达标, 通航安全性可靠。

关键词: 船闸; 口门区; 连接段; 通航水流条件

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0116-07

Experimental study on navigable flow condition of Yaoshan Hub in Jinjiang River

XU Junfeng, ZHAO Jiaqiang

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT,

Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin 300456, China)

Abstract: In response to the issues of large intersection angles between the centerlines of the upstream and downstream approach channels of the newly-built ship lock at the Jinjiang Yaoshan Hub and the river course, together with narrow river channels and short transitions, an experimental study on the optimization of the ship lock layout scheme is conducted by means of ship lock navigable flow condition tests and self-propelled ship model tests, and targeted measures for improving the flow conditions are proposed. The test results indicate that the adoption of permeable flow-isolating dykes in the upstream reach can enhance flow permeability, balance the velocity difference between the approach channel and the main navigation channel, and reduce the flow velocity gradient. After optimizing the length and height of the separation dike, the direct scouring impact of the mainstream on the lock entrance area is mitigated, and the adverse flow patterns such as cross-currents and backflows in the entrance area of the approach channel are effectively attenuated. In the downstream reach, adjusting the riverbed slope can improve the tailwater flow pattern, while connecting the downstream channel to the dredged zone for additional energy dissipation can buffer the downward-discharging flow. These combined measures effectively improve the navigable flow conditions of the Yaoshan ship lock, providing a technical reference for the layout design of ship locks in S-shaped curved river reaches. Ship model tests show that when the maximum navigable discharge is $160\text{ m}^3/\text{s}$, ships can maintain stable heading while passing through the entrance areas of the upstream and downstream approach channels and the transition sections. Parameters such as rudder angle and drift distance all meet the standards, ensuring reliable navigation safety.

Keywords: ship lock; entrance area; transition section; navigable flow condition

对于S形急弯河段, 由于其特殊河势条件及流速分布特征, 船舶航行通过时操纵难度加大、

航迹带宽度增加, 所要求的航道水流条件及航道尺度也不同于一般的直线段航道, 整治难度相对

收稿日期: 2025-07-09 录用日期: 2025-07-25

作者简介: 徐俊锋(1983—), 男, 博士, 副研究员, 从事港口航道及水利工程研究工作。

较大^[1-2]。针对上述问题的研究方法主要是水工模型试验,郑红杰^[3]采用定床河工模型试验分析引航道与口门区通航水流条件,给出优化方案;祁永升等^[4]采用整体河工模型分析不同角度布置的透空型隔流堤对口门区流场分布的影响,使得口门区通航区域横向流速满足规范要求^[5];赵家强等^[6]通过船闸整体定床模型试验,通过优化航线,有效改善了东溪船闸的通航水流条件,为C形弯曲河段船闸布置提供参考;于广年等^[7]采用增大口门区附近过流面积,有效改善七星墩船闸上游口门区及连接段通航水流条件;王熔荣等^[8]通过设置导流墩对急弯河道下游口门区水流条件进行了优化;郑宝友等^[9]通过开挖弯道处的凸出台地拓宽河道宽度,对那吉航运枢纽船闸布置方案进行了优化;徐俊锋等^[10]通过复式开挖、喇叭口状开槽疏浚及封堵汊道的工程措施,优化了碾盘山船闸上下游通航水流条件;王建平等^[11]以调整河势为手段削弱弯道螺旋流不利影响,改善了口门区的横向流速和回流流速。本文参考以上类似工程问题的研究进展和方法,提出了适合锦江瑶山船闸口门区通航水流条件的优化措施,以期类似S形急弯河段新建船闸提供技术参考。

1 工程概况

瑶山枢纽上下游存在浅洲,河道较窄,枯水航宽仅20 m左右,上下游均存在S形急弯,转向角较大,尤其是枢纽下游,由于塘头枢纽与瑶山枢纽水位不衔接,瑶山枢纽坝下流速较急,进一步恶化了通航水流条件,为满足工程要求,需要进行切滩、疏浚及护岸等工程措施。枢纽正常蓄水位75.62 m,死水位71.32 m,总库容321万m³,兴利库容241万m³,死库容8万m³,属日调节水库。设计洪水频率30 a一遇,相应洪峰流量2 210 m³/s,下泄流量2 210 m³/s,库水位78.14 m、下游水位77.37 m;校核洪水频率200 a一遇(经锦江水库调节后为1 000 a一遇),相应洪峰流量3 000 m³/s,下泄流量3 000 m³/s,库水位79.47 m、下游水位78.47 m。瑶山枢纽新建船闸工程等级为V级,闸首、闸室主要建筑物等级为4级,导航墙、靠船

墩次要建筑物等级为5级。双线船闸方案船闸有效尺度为60 m×12 m×2.5 m(闸室有效长度×闸室有效宽度×门槛最小水深),瑶山枢纽平面布置见图1。



图1 锦江瑶山枢纽平面布置

Fig. 1 Plan layout of Jinjiang Yaoshan Hub

2 模型设计及验证

2.1 物理模型范围比尺

瑶山枢纽位于锦江汇流口以上约16 km,枢纽所在河段河道弯曲,下游均存在S形急弯,根据工程河段实际情况,将模型范围确定为上游2.0 km—下游6.2 km,见图2。上游为流量边界,下游为水位边界。模型范围满足瑶山枢纽船闸整体物理模型试验需求以及相关规范的进、出口及过渡段要求。依据试验目的和要求,根据河道特征、河床形态、地形特点,同时为保证模型的水流运动相似和船模航行相似,整体模型为定床正态,几何比尺选用1:80,按重力相似准则进行模型设计。



注:范围包括下游航道整治模型试验研究部分。

图2 瑶山枢纽模型试验整体布置

Fig. 2 Overall layout of the model test for Yaoshan Hub

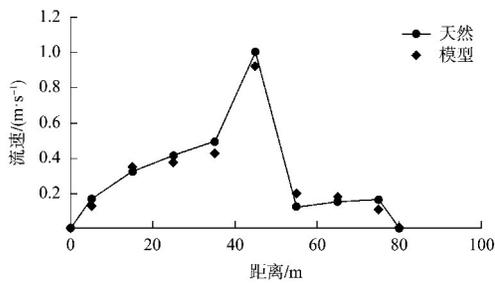
2.2 模型验证

试验开展了模型水位、断面流速分布验证。结果表明,模型沿程各水尺水位与实测水位基本一

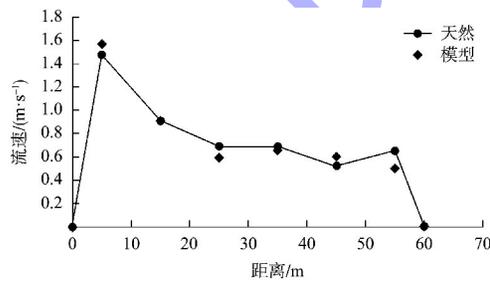
致，沿程测点的模型水位与天然水位差均在 0.1 m 以内，满足模型与原体阻力基本相似要求，模型水位验证成果见表 1。各断面模型流速分布趋势、主流区位置及流速大小与实测资料基本一致，流量偏差在 5% 以内，验证结果满足相关规范要求，断面流速分布验证成果见图 3。

表 1 模型水位验证结果

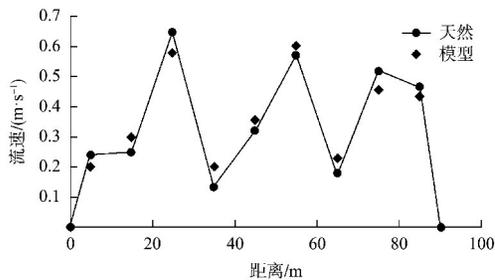
与枢纽距离	模型水位	实测水位	差值
250	68.80	68.82	-0.02
800	68.11	68.18	-0.07
1 400	66.41	66.50	-0.09
4 250	66.13	66.13	0.00
4 450	66.02	65.97	0.05
4 750	65.77	65.82	-0.05
5 150	65.78	65.78	0.00



a) 1#断面(距枢纽265 m)



b) 2#断面(距枢纽120 m)



c) 3#断面(距枢纽540 m)

图 3 断面流速分布验证成果

Fig. 3 Cross-section flow velocity distribution validation results

3 上游引航道口门区及连接段试验研究

3.1 上游设计方案

3.1.1 方案布置

上游引航道长约 38 m，引航道轴线与主航道轴线采用圆曲线相接。上游引航道设计底宽为 43.4 m，设计底高程为 72.82 m。引航道设计底宽为 43.4 m，设计底高程为 63.52 m，瑶山船闸设计方案平面布置见图 4。

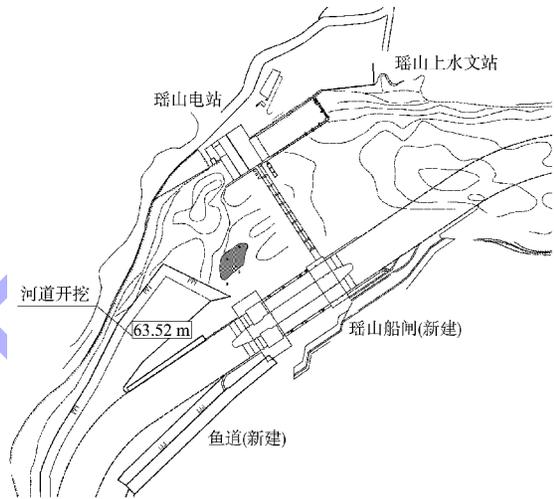


图 4 瑶山船闸设计方案平面布置

Fig. 4 Plan layout of Yaoshan ship lock design scheme

3.1.2 试验成果

上游通航流量($Q=200\text{ m}^3/\text{s}$)时，枢纽上游引航道口门区段航道流速增至 0.6 m/s 左右，且该段航道由于电站引流及左侧凸岸的挑流作用，口门区水流与航道夹角较大，口门区横流存在 0.25 ~ 0.40 m/s 的超标区。该流量及以上时，设计方案不能满足上游通航需要。

3.2 上游优化方案 1-1

优化思路：因上游连接段左岸地形高，边坡开挖工程量巨大，故采取在上游连接段左岸布置底部透水导流堤来增强水流渗透性，减小左侧凸岸挑流作用。导堤长 30 m，高 3 m，顶高程 74.82 m。

3.3 上游优化方案 1-2

针对优化方案 1-1 存在的横流超标问题，优化方案 1-2 加长透水导流堤，尝试减小甚至消除超标区，透水导流总长度为 50 m，其他不变。

3.4 上游优化方案 1-3

优化方案 1-2 通航水流条件虽较优化方案 1-1 改善但不甚明显, 究其原因是受河势条件制约, 单纯调整隔流堤长度并不能改善口门区引航道水流条件。优化方案 1-3 在优化方案 1-1 基础上, 修改堤顶高程至 75.62 m, 提高 3.8 m。

3.5 上游优化方案 1-4

在调整隔流堤高度的同时, 增加隔流堤长度, 减小河势条件制约, 优化方案 1-4 在优化方案 1-3 基础上, 加长导流堤到 50 m, 以期进一步改善优化方案 1-3 横流超标问题。

3.6 上游优化方案效果分析

经 4 次优化后, 各方案对比见表 2。各优化方案工程后横向流速分量明显减小, 见图 5。透水式

隔流堤长度和高度的同步调整使得航道内流速继续降低, 航道内水流与航线夹角进一步减小, 由 20°减小为 10°, 透水导流堤弯道顶部口门区及连接段的航道范围内不存在横向流速超过 0.25 m/s 的超标区, 较设计方案降低幅度约 0.15 m/s, 通航水流条件较工程优化方案 1-1、1-2 及 1-3 改善效果明显。透空式隔流堤结构见图 6。

表 2 上游各优化方案口门区连接段横流统计 ($Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$)
Tab. 2 Statistics of cross-flows in the mouth area and transition section for each upstream optimization scheme ($Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$)

优化方案	最大横流/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	超标范围(>0.25 m/s)
1-1	0.35	弯道顶部 10~40 m
1-2	0.35	弯道顶部 30~40 m
1-3	0.35	弯道顶部 20~40 m
1-4	0.25	无

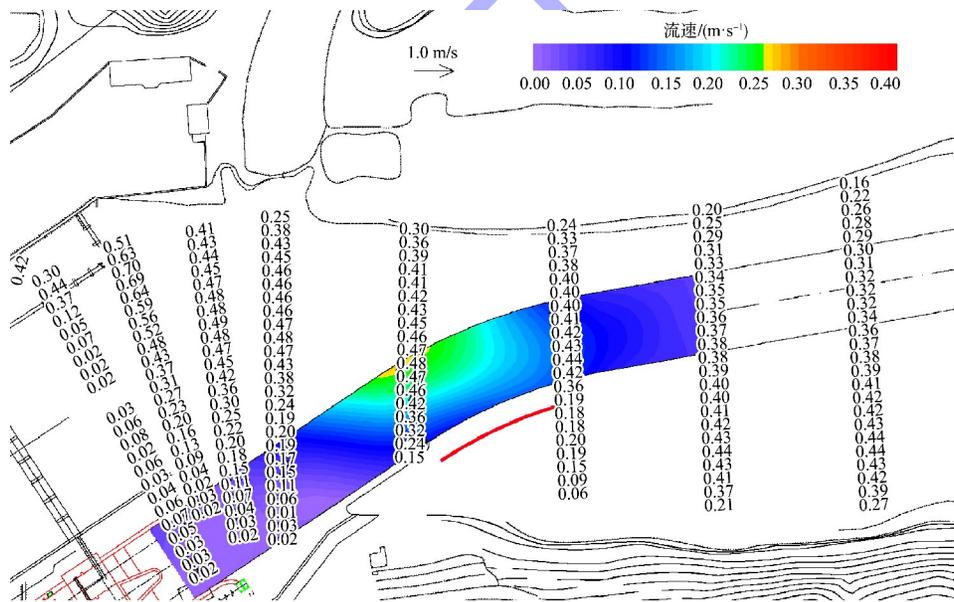


图 5 上游优化方案引航道口门区及连接段流速分布 ($Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 5 Velocity distribution in the entrance area and transition section of approach channel for the four upstream optimization schemes ($Q=200 \text{ m}^3/\text{s}$)

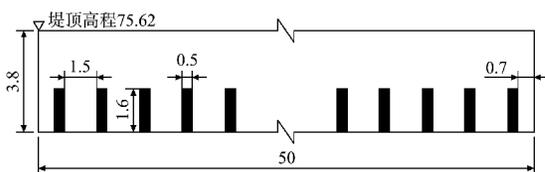


图 6 透水式隔流堤结构 (单位: m)

Fig. 6 Structure of permeable flow-isolating dyke (unit: m)

船模试验表明: 优化方案 1-4 工程后, 最大通航流量 $Q=160 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 船模以 2.00 m/s 航速下行通过主航道弯道处时, 船模最大操舵至 18.26° 转向, 随后最大操舵 -22.59° 调整航态便可通过该处弯道。进入主航道直线段时, 船模调整航态所需舵角最大时为 -20.44°, 航行漂角最大时为 -11.30°。行至距口门约 250 m 处时, 船模转向所需舵角最

大为 -10.93° ，通过连接段弯道后，随即操舵 19.40° 调整航态进入船闸引航道内。船模通过连接段航道航行漂角最大为 17.50° ，口门区段航道航行漂角最大为 13.48° 。

船模以 2.00 m/s 航速上行时，通过口门区段航道时，船模先操舵 17.86° 转向，随即操舵 -25.51° 调整航态进入连接段航道，调整航态时船模漂角最大时为 -4.36° 。连入连接段航道时，船模转向所需舵角最大时为 -12.30° ，通过该段航道时航行漂角最大时为 -12.24° 。通过弯道段后，船模航行时调整航态所需舵角最大时为 16.31° ，航行漂角最大时为 6.62° 。船模行至距口门 800 m 处弯道时，过弯时航行漂角最大时为 10.75° ，通过弯道所需舵角最大时为 -10.51° 。左右侧船闸通航船舶均能够通过上游口门区及连接段航道进出船闸引航道。

4 下游引航道口门区及连接段试验研究

4.1 下游设计方案

4.1.1 方案布置

下游引航道长约 38 m ，引航道轴线与主航道轴线采用圆曲线相接。引航道设计底宽为 43.4 m ，设计底高程为 63.32 m 。枢纽坝下右侧河道开挖，开挖底高程 63.52 m ，并从引航道末端处沿航道右边线布置一条直立式挡墙，长 74.5 m 。

4.1.2 试验成果

设计方案 $120\text{ m}^3/\text{s}$ 流量时，由于坝下开挖，电站出流在开挖处集中后快速下泄，加之航道挖槽及其吸流影响，电站下泄尾水在引航道口门区及连接段航道产生较严重跌水，水流流态杂乱。电站出流以较大角度和速度进入航道，下游口门区及连接段内流态较差，斜流、回流等不良流态较为明显，无法满足规范要求。

4.2 下游优化方案 2-1

针对设计方案中船闸下游口门区及连接段存在的流态较差，斜流、回流等不良流态较为明显问题，对坝下右侧河道进行开挖调整，开挖范围较设计方案有所减小，即取消设计方案左侧三角区

开挖，剩余长方形范围内开挖底高程为 63.52 m 。

4.3 下游优化方案 2-2

针对优化方案 2-1 中船闸下游口门区及连接段仍存在的航道内流速过大问题，对坝下右侧河道进行拓宽 1 m ，以期分散出流，解决下游口门区及连接段横流和回流超标问题。

4.4 下游优化方案 2-3

电站下游坝下 $50\sim 100\text{ m}$ 范围以 $1:50$ 坡度疏浚，目的是调整河道底坡，改善电站尾水下泄流态，同时下接底高程为 65.00 及 63.52 m 疏浚区，以增加消能，进一步缓冲下泄水流，减轻对下游航道影响。同优化方案 2-2，航道右侧进行拓宽，以改善弯道段水流流态，方案布置见图 7。

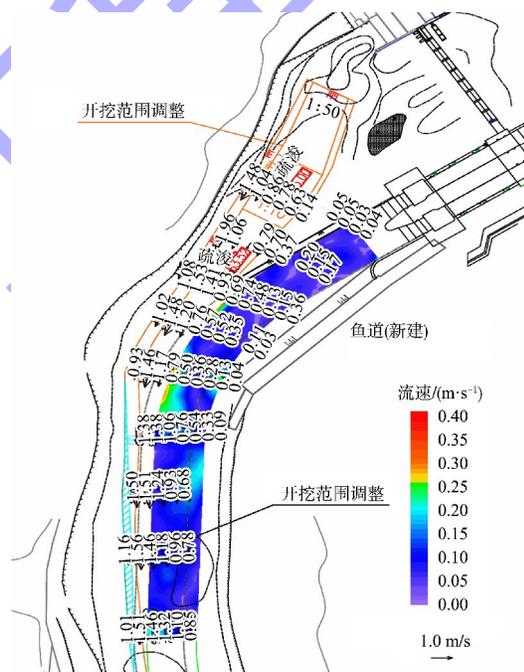


图 7 下游优化方案 2-3 工程布置及引航道口门区及连接段流速分布 ($Q=120\text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 7 Engineering layout and velocity distribution in the entrance area and transition section of approach channel for downstream optimization scheme 2-3 ($Q=120\text{ m}^3/\text{s}$)

4.5 下游优化方案效果分析

经 3 次优化后，各方案对比见表 3。优化方案 2-3 工程后，水流均匀下泄，分散进入下游河段；口门区段水流流速不大，基本在 1.10 m/s 以内，最大回流流速为 0.36 m/s ，均满足规范要求，仅在口门区末端航道弯顶右边线处存在一处横流 $0.25\sim 0.30\text{ m/s}$ 范围较小的区域，基本满足规范要

求。随着上游来流汇入,连接段航道内各断面最大流速 1.36~1.79 m/s,且水流与航道夹角在 15°以内,横流强度基本在 0.25 m/s 内,通航水流条件总体较好,见图 7。

表 3 下游各优化方案口门区连接段横流统计 ($Q=120 \text{ m}^3/\text{s}$)
Tab. 3 Statistics of cross-flows in the entrance area and transition section for each downstream optimization scheme ($Q=120 \text{ m}^3/\text{s}$)

优化方案	最大横流/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	超标范围(>0.25 m/s)
2-1	0.32	弯道顶部 130~190 m
2-2	0.30	弯道顶部 130~200 m
2-3	0.30	弯顶航边线处

船模试验表明:优化方案 2-3 工程后,最大通航流量 $Q=160 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,船模以 3.00 m/s 航速下行通过口门区段航道时最大操舵 -20.46° 向左转弯,转向时航行漂角最大时为 6.42° 。进入连接段弯道时,船模调整航态所需舵角最大时为 -18.94° ,航行漂角最大为 10.34° ,船模下行至距口门 400 m 处时,通过弯道所需舵角最大时为 -22.18° ,过弯时航行漂角最大为 12.82° 。进入下游直线段航道后航行较顺利,调整航态所需舵角最大为 18.88° 。行至口门下游 1 000 m 处弯道时,船模最大操舵 -18.39° 转向,过弯时航行漂角最大为 7.87° 。

船模以 4.00 m/s 航速上行通过下游主航道时,航行调整航态所需舵角最大为 22.57° ,漂角最大时为 5.55° 。进入连接段航道后,船模通过该处弯道所需舵角最大为 26.38° ,通过弯道时航行漂角最大为 9.13° 。进入口门区段航道后,船模最大操舵 26.75° 调整航态进入船闸引航道内,口门区段航道航行时漂角最大为 -12.13° 。左右侧船闸通航船舶均能够通过下游口门区及连接段航道进出船闸引航道。

5 结语

1) 锦江瑶山枢纽船闸设计方案通航水流条件试验表明:上游电站引流及左侧凸岸挑流,加之航道中心线与主流流向夹角较大,流量 $200 \text{ m}^3/\text{s}$ 及以上时不能满足通航需要。下游坝下开挖,电站出流在开挖处集中后快速下泄,加之航道挖槽及吸

流影响,电站尾水在引航道口门区及连接段航道产生较严重跌水,水流流态杂乱,流量 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 及以上时无法满足规范要求。

2) 对于上游,采取底部透水导流堤来增强水流渗透性,尝试减小甚至消除流速超标区。上游优化方案 1-1~1-4 对透水导流堤长度和高度优化试验表明,受河势条件制约,单纯调整上游隔流堤长度或高度,无法有效改善上游口门区水流条件。多次试验成果表明,在采用高程 75.62 m、长 50 m 的加长透水导流堤后,效果良好,能够保证船舶顺利进出上游口门区和连接段。

3) 对于下游,对坝下右侧河道进行开挖调整,目的是解决口门区及连接段横流超标问题。下游优化方案 2-1~2-3 对开挖高程和范围的优化试验表明,通过坝下调整河道底坡改善尾水流态,下接不同高程的疏浚区增加消能,进一步缓冲了下水水流,减轻了对下游航道影响,通航水流条件总体较好。

参考文献:

- [1] 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Navigation standard of inland waterway: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [2] 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
ZHANG R J. River sediment dynamics[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2002.
- [3] 郑红杰. 上游引航道透空隔流堤布置与通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2022(12): 146-151.
ZHENG H J. Layout of open-type separation levee and optimization of navigation flow conditions in upstream approach channel [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 146-151.
- [4] 祁永升, 许光祥, 李昌耀. 改善二线船闸下游引航道口门区流态的补流措施研究[J]. 水运工程, 2023(7): 157-163, 224.
QI Y S, XU G X, LI C Y. Supplementary flow measures to improve flow pattern at entrance area of downstream approach channel of second ship lock [J]. Port &

waterway engineering, 2023(7): 157-163, 224.

[5] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001 [S]. Beijing: China Communications Press, 2001.

[6] 赵家强, 于广年. 韩江东溪船闸通航水流条件优化试验研究[J]. 水运工程, 2019(10): 134-140.
ZHAO J Q, YU G N. Experimental study on navigation flow condition of Dongxi ship lock in Hanjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2019(10): 134-140.

[7] 于广年, 赵家强. 七星墩船闸上游口门区及连接段通航水流条件优化试验研究 [J]. 水运工程, 2022 (5): 110-114.
YU G N, ZHAO J Q. Optimization of navigable flow conditions at upstream entrance area and connecting section for Qixingdun ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2022(5): 110-114.

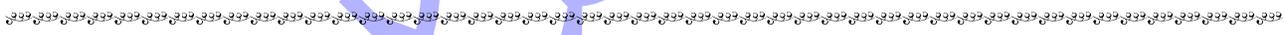
[8] 王熔荣, 赵根生, 张首元, 等. 导流墩对急弯河道下游口门区水流条件的改善作用 [J]. 水运工程, 2023 (3): 99-104.
WANG R R, ZHAO G S, ZHANG S Y, et al. Improvement effect of diversion pier on flow conditions in downstream entrance area of sharp bend channel [J]. Port & waterway engineering, 2023(3): 99-104.

[9] 郑宝友, 陈波. 船闸上游口门区连接段为弯道的通航水流条件[J]. 水道港口, 2005, 26(2): 99-102, 108.
ZHENG B Y, CHEN B. Test on navigation flow condition of curving connect section of upstream lock entrance [J]. Journal of waterway and harbor, 2005, 26 (2): 99-102, 108.

[10] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 汉江碾盘山船闸扩建工程整体水工物理模型试验研究报告 [R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2025.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT. Experimental study report on the overall hydraulic physical model of Nianpanshan lock reconstruction and expansion project of Hongshui River [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, 2025.

[11] 王建平, 邢方亮, 陈奕芬. 弯曲河道船闸口门区通航水流条件优化[J]. 水运工程, 2019(11): 86-91.
WANG J P, XING F L, CHEN Y F. Optimization of navigable flow condition of ship lock entrance area in curved river [J]. Port & waterway engineering, 2019(11): 86-91.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 82 页)

[10] 刘志庆. 涡阳船闸改建工程下引航道通航水流条件研究[J]. 广东水利水电, 2024(7): 18-23.
LIU Z Q. Study on navigable flow conditions of the lower approach channel of Guoyang shiplock reconstruction project [J]. Guangdong water resources and hydropower, 2024(7): 18-23.

[11] 胡雨涵, 王志超, 郝嘉凌, 等. 赣江象山枢纽一期临时航道通航水流数值模拟应用研究[J]. 江西水利科技, 2022, 48(2): 87-92.
HU Y H, WANG Z C, HAO J L, et al. Application research on numerical simulation of navigable flow in the temporary channel of the first-stage Xiangshan Junction of Ganjiang River [J]. Jiangxi hydraulic science & technology, 2022, 48(2): 87-92.

[12] 裴子玥, 肖洋, 张涛涛, 等. 赣江尾闾南支枢纽通航水流条件数值模拟研究 [J]. 水运工程, 2024 (5): 143-150.
PEI Z Y, XIAO Y, ZHANG T T, et al. Numerical simulation of navigable water conditions at Nanzhi Hydro-Junction in Ganjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 143-150.

[13] 内河通航标准: GB 50139—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Navigation standard of inlandwaterway: GB 50139-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.

[14] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Technical specification for simulation test of water transportation engineering: JTS/T 231-2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

(本文编辑 赵娟)